

# トンネル換気の米国技術基準とその火災時への適応

辻本研究室

4107008 井上大彰

4107016 大場正直

## 1. 研究の背景と目的

現在国内ではリニアモーターカーの計画が進んでおり、地下鉄道での防災技術が改めて注目され始めている。また日本の鉄道技術はトップクラスであると言われていたが、防火基準の比較も必要と判断される。

本論では、高速鉄道の防火における米国基準に使用されている NFPA130 の内容をモデル化し検討を行う。

## 2. 研究方法

### 2-1 研究対象

NFPA130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, 2010 Edition

これは全米防火協会が策定、管理している高速鉄道における防火上の安全に関する基準である。

### 2-2 研究方法

NFPA130に記載されている換気に関する基準をモデル化し、想定したトンネル火災に適応していく。

## 3. NFPA130におけるトンネル火災対策のモデル化

実際の地下鉄火災を想定し、NFPA130に記載されている基準(表-1)を使い、安全に避難できるような条件を考える。

まずモデル化を進めていく上でいくつかの仮定を行う。

### 3.1 想定する車両火災

「鉄道車両の実大火災実験調査研究」<sup>2)</sup>および、「鉄道車両の火災対策研究」<sup>3)</sup>で行われた燃焼実験により、右下の図-1の発熱速度を想定したモデル火災とする。

燃焼実験を行った車両データ、本論で仮定する出火地点や避難方法を以下に記載する。

#### 3-1-1 車両概要

形状…長さ18m、幅2.8m、高さ3m 編成…8両編成、全長144m  
車両間出入り口幅…1.1m

座席…幅0.44m、奥行き0.57m、座席数40席

車両の材質…アルミニウム製車両

車両間の接続部ホロの材質…クロロプレンゴム

クロロプレンゴム着火の限界受放射量…5.8kW/m<sup>2</sup>(文献<sup>4)</sup>参照)

#### 3-1-2 トンネル概要

形状…高さ6.5m、幅7.9m、断面積48m<sup>2</sup>(北陸トンネルの形状を参考)

#### 3-1-3 出火地点

本論ではまず煙による被害を考える為、避難方向とは逆方向に換気を行う。出火地点は列車の後部車両8両目内部の最後尾とし、先頭車両1両目から避難するものとする。

#### 3-1-4 乗客の避難

定常時の乗客を一車両160人、混雑率を274人とする。また1m<sup>2</sup>に存在できる最大の人数を8人/m<sup>2</sup>と仮定し、8人/m<sup>2</sup> × 40.37m<sup>2</sup> = 323人(車両床面積: 40.37m<sup>2</sup>)一車両に最大323人乗れるものとする。避難は全員、先頭車両の一番前の扉から梯子で一人ずつ降りるものとし、その長さを0.96m、梯子上での移動速度を0.48m/sとする。0.96m ÷ 0.48m/s = 2s によって、先頭車両からの排出人数は0.5人/sとする。

表-1 NFPA130 評価基準の概要

換気方式	縦流換気方式
騒音レベル	火災発生から最初の数秒間は115dB、残りの避難中は92dB。
気流速度	駅内や路線内の気流速度は0.75m/s以上である。緊急避難や緊急隊員が使用する駅内や路線内の気流速度は11.0m/s以下でなければならない。
Smoke Obscuration Level	80lxで照らされた標識が30m離れた位置でも確認でき、扉や壁は10m離れた位置にあっても確認出来なければならない。
排煙	天井の高さが3m以上の避難経路においては高さ2m以内の煙は除去するべきであり、予測手法の精度は25%以内であり、高さ2.5m以内の煙を除去する必要がある。
一酸化炭素濃度	*表-2
放射熱流による影響	放射熱流により体表面が耐える事のできる時間Taは、放射熱流qが2.5kW/m <sup>2</sup> 以下であった場合、30分以上の間耐えることができ、放射熱流qがそれ以上であった場合 $Ta = 4q^{-1.35}$ (Ta=時間(min) q=放射熱流(kW/m <sup>2</sup> ))の式によって求めることができる。
気温による限界避難時間	気温tによる避難時間Tb, Tcの限界値は、次の式を用いて求めることができる。 *十分な着衣量を満たしている場合 $Tb = (4.1 \times 108) \times t^{-3.61}$ *十分な着衣量を満たしていない場合 $Tc = (5.0 \times 107) \times t^{-3.4}$

表-2 火災発生から各時間における一酸化炭素濃度

火災発生時からの時間	一酸化炭素含有量
最初の数秒間	最大2000ppm以下
6分間の平均	平均1150ppm以下
15分間の平均	平均450ppm以下
30分間の平均	平均225ppm以下
熱流にさらされた総時間の平均	平均50ppm以下

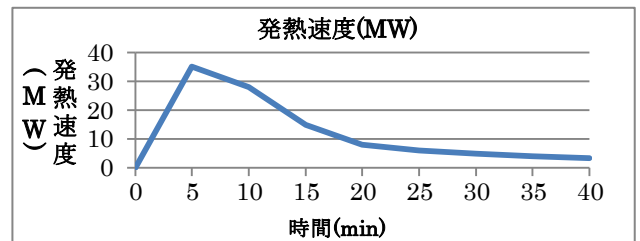


図-1 文献<sup>2)3)</sup>の発熱速度

### 3-2 煙による影響

以上の仮定を考慮し発熱速度の最大値 35MW の時の遡上阻止風速を求め、避難側に煙が広がらない状況を考える。また想定するトンネル火災を図-2 に図示する。

遡上阻止風速:  $V_c = (gHQ / \rho C_p AT_0)^{1/3}$  (文献<sup>5)</sup>)

A: トンネル断面積(m<sup>2</sup>) Cp: 定圧比熱

g: 重力加速度(m/s<sup>2</sup>) H: トンネル高さ(m)

T<sub>0</sub>: 入口付近の温度(K) Vc: 遡上阻止風速(m/s)

Q: 発熱速度(kW) ρ: 密度(kg/m<sup>3</sup>)

とし遡上阻止風速を求めると  $V_c = 5.0\text{m/s}$  となる。NFPA130 より気流速度 0.75m/s~11.0m/s に保つ事が推奨され、遡上阻止風速を 11.0m/s と仮定し発熱量を逆算すると、 $Q = 382.63\text{MW}$  となる。最大の風速で換気をする場合、本論で仮定した 35MW の約 11 倍の発熱量まで煙の遡上を阻止する事ができ、最大発熱速度に達するまでに換気機器を十分に作動させる事が出来れば煙による被害は少ないことが分かる。

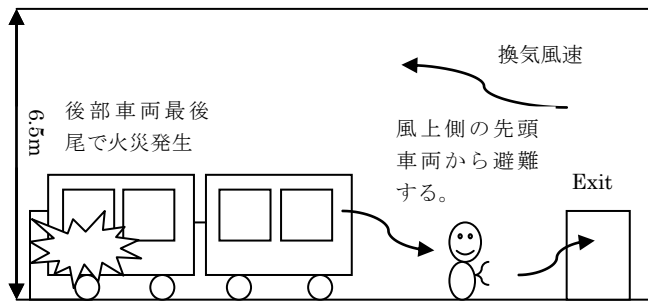


図 - 2 仮定を含めた火源からの避難モデル

### 3-3 放射による影響

本論では次にトンネル天井面からの放射による影響を考える。文献<sup>6)</sup>に記載されたトンネル天井近傍の最高到達温度のグラフを図-1 の発熱量での場合に換算し、1分・2分・3分・4分・5分での 0m~150m 区間における温度分布を求め(図-3)、温められた天井面から放射される熱流の影響を考える。また、トンネル天井面から列車天井面を通過し、乗客に与える放射の影響は無視し、換気は行っていないものとする。

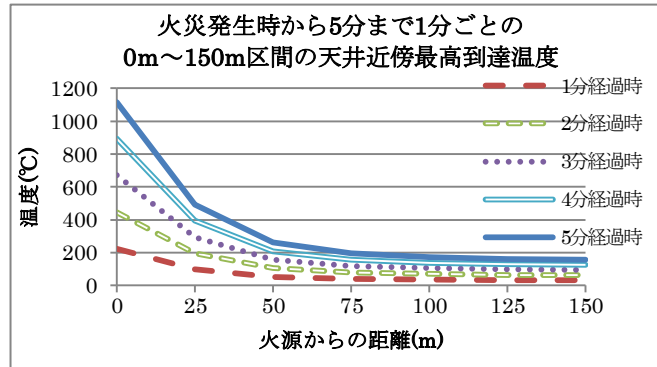


図 - 3 天井近傍の最高到達温度

図-3 の温度から黒体放射されるとし、表-1 の放射熱流の式を用い、最大発熱速度 35MW を発する時の列車外部で乗客が天井面からの放射により耐えられる時間を表-3 に計算した。

表 - 3 列車外部で乗客が放射に耐えられることのできる時間

火源からの距離(m)	0m	25m	50m	75m	87.5m 以上
火災発生から 5 分後の最大発熱速度の時の放射に耐えられる時間(min)	0.003	0.072	0.498	1.026	30 分以上

以上より、87.5m 以内の区間の列車外では、放射熱流に耐えられる時間は非常に短く、87.5m 以上の区間では 30 分以上天井面からの放射に耐えることができ、先頭車両から避難する事が出来れば安全である事が分かる。

次に列車内部を安全に避難する為に、列車接合部ホロが放射熱流により受ける影響を考える。ホロの材質クロロブレンゴムの限界熱流を 5.8kW/m<sup>2</sup> とし、ホロが放射により受ける影響を火災発生時から 5 分まで 1 分ごとに求めると表-4 になる。

表 - 4 各時間における放射熱により列車接合部が受ける影響

経過時間	放射熱流による列車接合部の影響
1 分後	列車接合部が放射による燃焼の心配はない。
2 分後	8 両目の車両 (最後尾) と 7 両目の接合部が燃焼。
3 分後	8 両目の車両 (最後尾) と 7 両目の接合部が燃焼。
4 分後	8 両目から 6 両目までの接合部が燃焼。
5 分後	8 両目から 6 両目までの接合部が燃焼。

また最後尾の車両から避難する乗客が、最大発熱速度に達するまでの 5 分間で 1 分ごとに避難出来る距離を計算する。計算式、また結果(表-5)を以下に示す。

歩行速度:  $v = 1.5 / \rho$  避難時間:  $T = N / 1.5B$

v: 群衆歩行速度(m/s) ρ: 群衆密度(人/m<sup>2</sup>)

N: 居室の避難対象人数(人) B: 出入口幅(m)

以上の両式で各車両からの避難時間を計算し、大きいほうの値を各車両からの避難時間とする。

時間当たりに出る人数が車両間と先頭車両では先頭車両の方が小さいので、乗員が詰まる状態になる時間を算出し、その時点からは乗客が心太方式で先頭車両から 0.5 人/s で排出されるものとする。

表 - 5 混雑時と定員時の各時間における最後尾の位置

経過時間	混雑時の避難者の最後尾位置	定員時の避難者の最後尾位置
1 分後	火源から 13.3m の位置まで避難 (8 両目)	8 両目と 7 両目の接続部で滞留。(8 両目)
2 分後	8 両目から 7 両目の移動で滞留する (8 両目)	火源から 26.7m の位置まで避難 (7 両目)
3 分後	火源から 21.0m の位置まで避難 (7 両目)	7 両目と 6 両目の接続部で滞留。(7 両目)
4 分後	火源から 34.4m の位置まで避難 (7 両目)	火源から 53.4m の位置まで避難 (6 両目)
5 分後	7 両目と 6 両目の接続部で滞留。(7 両目)	火源から 57.4m の位置まで避難 (5 両目)

表-4 と表-5 を比較すると、定員時では安全に避難することができるが、混雑時では乗客が 8 両目から 7 両目に避難する間に接合部のホロが燃焼してしまい、安全に避難することができない。

### 4. まとめ

本論での天井面からの放射による影響を考えた場合には、換気がないものと仮定した為、混雑時に乗客者全員を安全に避難させる事は難しいという結果になった。安全に避難させるには換気の担う役割は大きく、煙の遡上を阻止する為にも、一定の換気は行うべきである。また最大の発熱速度に達する前に火源からできるだけ早く離れることが重要となり、火災発生直後の速やかな避難が求められる。

### 参考文献

- (1) NFPA130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, 2010年
- (2) 鉄道車両の実大火災実験調査研究, 東京消防庁, 1994年
- (3) 鉄道車両の火災対策研究, (社)日本鉄道技術協会, 1991年
- (4) 膜材料の防火性能に関する研究, 建築省建築研究所, 1984年
- (5) Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safty Journal, 1995年
- (6) Propagation and Development of Temperature from Tests with Railway and Road Vehicles -Comparison between Test Data and Temperature Time Curves of Regulations, Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, 1994年
- (7) 加藤浩徳: 都市鉄道の混雑率の測定方法, 運輸政策研究機構, 2005年
- (8) 田中喙義: 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 1993年
- (9) 斎藤平蔵: 建築気候, 共立出版株式会社, 1974年
- (10) 火災と建築, 共立出版株式会社, 2002年